

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra telekomunikační techniky

Počítačem generované hologramy v optoelektronice

Computer generated holograms in optoelectronics

2011

Jan Slivečka

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra telekomunikační techniky

Zadání bakalářské práce

Student: **Jan Slivečka**
Studijní program: B2647 Informační a komunikační technologie
Studijní obor: 2601R013 Telekomunikační technika
Téma: Počítačem generované hologramy v optoelektronice
Computer generated holograms in optoelectronics

Zásady pro vypracování:

1. Shrnutí teorie holografického zobrazování.
2. Počítačem generované hologramy a jejich využití ve vědeckých a inženýrských aplikacích.
3. Selektivní buzení vedených módů v optických vláknech.
4. Realizace počítačem generovaných hologramů a ověření jejich funkčnosti.

Seznam doporučené odborné literatury:

SALEH, Bahaa E. A.; TEICH, Malvin Carl. *Základy fotoniky*. Vydání 1. Praha: Matfyzpress, 1994. 226 s. ISBN 80-85863-00-6.


Další literatura dle pokynů vedoucího práce.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Jan Skapa, Ph.D.**

Datum zadání: 19.11.2010

Datum odevzdání: 06.05.2011


prof. RNDr. Vladimír Vašínek, CSc.
vedoucí katedry




prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě 6. května 2011

.....

Poděkování

Rád bych poděkoval panu Ing. Janu Skapovi, Ph.D. za odborné vedení bakalářské práce, za poskytnuté studijní materiály a také za nasměrování k řešení v boji s Matlabem.

Abstrakt

Tato práce pojednává o teorii holografického zobrazování klasických i počítačem generovaných hologramech a jejich následné vhodné využití. V úvodu jsme nastínili problematiku vlnové optiky, která je základním kamenem pro popis vlastností a chování světla.

Druhou část jsme věnovali selektivnímu buzení módů v optických vláknech, výhody této metody a teoretickou aplikaci ve 4-f systému.

V závěru jsme realizovali počítačem generované hologramy vytisknuté na folii pomocí 4-f systému v laboratorních podmínkách.

Klíčová slova: hologram, holografie, počítačem generovaný hologram, syntetický hologram, vlnová optika, selektivní buzení, optoelektronika

Abstract

This thesis deals with the theory of holographic imaging of classic and computer generated holograms and their appropriate use. In introduction we introduce an issue of wave optics, which is trivial for description of property and behavior of the light.

Second part consists of the selective excitation of fibre modes, their advantages and a theoretically application in 4-f system.

In epilogue we realize a computer generated holograms, which were printed on transparent foil for laser printers, Then we applicated holograms in 4-f system.

Keywords: hologram, holography, computer generated hologram, synthetic hologram, wave optics, selective excitation, optoelectronics

Seznam použitých zkratk a symbolů

AL	-	Asférická čočka
CD	-	Compact disc
CCD	-	Charge coupled device
DVD	-	Digital video disc
FČ	-	Fourierova čočka
HVD	-	Holographic versatile disc
IEC	-	International electrotechnical commission
LASER	-	Light amplification by stimulated emission of radiation
LCD	-	Liquid crystal display
PC	-	Personal computer
PGH	-	Počítačem generovaný hologram
PMS	-	Prostorový modulátor světla
SLM	-	Spatial light modulator

Obsah

Úvod.....	1
1 Světlo jako vlnění	2
1.1 Vlastnosti světla	2
1.2 Vlnová optika	3
1.2.1 Intenzita, výkon a energie	3
1.2.2 Druhy vln	4
1.2.3 Jevy na rozhraní dvou objektů	4
1.3 Holografie	10
1.3.1 Záznam hologramu.....	11
1.3.2 Rekonstrukce hologramu	11
1.4 Fotografie versus hologram.....	12
1.5 Realizace hologramu.....	12
2 Počítačem generované hologramy	14
2.1 Charakteristika	14
2.2 Využití a aplikace.....	14
2.3 Nahradí hologram Blu-ray?.....	15
3 Módy ve vlákne	16
3.1 Úvod do optoelektroniky.....	16
3.2 Selektivní buzení.....	16
3.3 Realizace	16
4 Realizace PGH.....	18
4.1 Návrh.....	18
4.1.1 Specklový obrazce	19

4.1.2	Difrakční pokus s kruhovou aperturou	20
4.2	Vytvoření PGH v prostředí Matlab	23
4.3	Realizace PGH v laboratoři pomocí 4-f systému	27
Závěr		30
Literatura.....		31
Přílohy.....		34

Úvod

Již v dávných dobách 15. století se Leonardo da Vinci snažil ve svých obrazech zachytit použitím perspektivy prostorový dojem. Až vynálezem hologramu v čtyřicátých letech 20. století a vynálezu laseru v šedesátých letech umožnil zaznamenat a zobrazit třetí rozměr dvourozměrného obrazu. Spolu s evolucí počítačů vznikl vedle hologramu ještě počítačem generovaný hologram, který má mnohem širší spektrum využitelnosti a začíná se i přes svou výrobní náročnost vyvíjet v odvětví jako například optický datový nosič nebo pro selektivní buzení vedených módů v optických vláknech.

Hologram se již dnes hojně užívá jako bezpečnostní prvek na ceninách, bankovkách a je také využíván v materiálovém inženýrství pro simulaci namáhání. Pro svou nákladnost na konstrukci ale začíná být vytlačován počítačem generovanými hologramy, které jsou zejména pro sériovou výrobu vhodnější, protože se mohou tisknout v nekonečném množství kopií a nepotřebují žádnou negativní matici. Další nespornou výhodou je jejich editovatelnost v simulačním prostředí, které umožní sestavit PGH „na míru”.

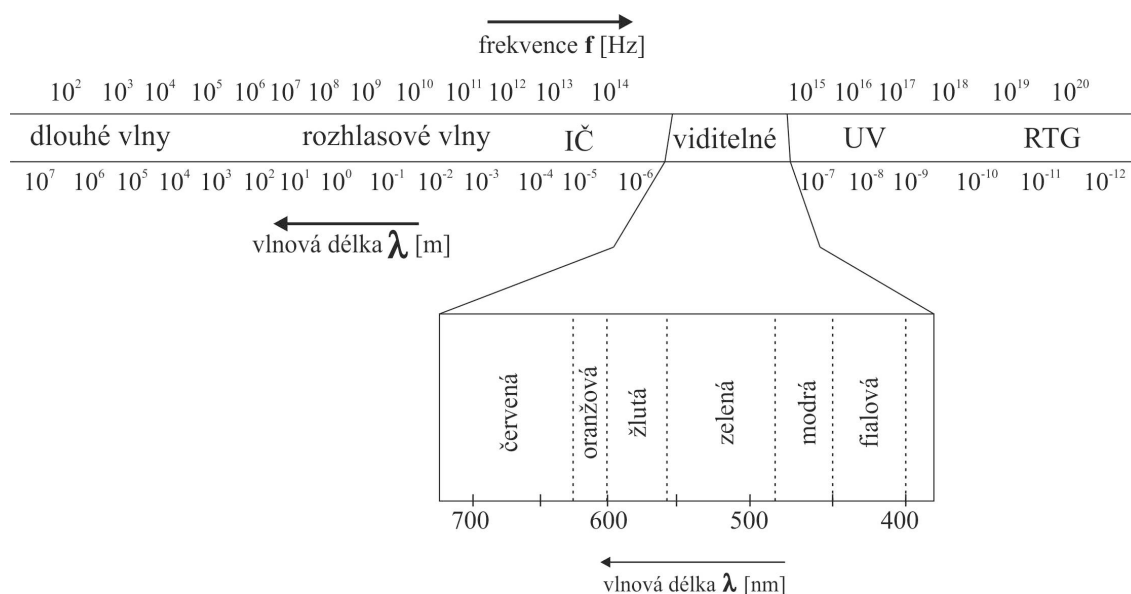
V telekomunikacích a optoelektronice začíná též počítačem generovaný hologram nabývat významu zejména při selektivním buzení vedených módů v optických vláknech. Vhodně navržený počítačem generovaný hologram dokáže upravit vstupní módy tak, aby se jádrem šířili „ve šroubovici”. Tímto efektem můžeme docílit řádný odstup jednotlivých bitů na výstupu fotodetektoru a eliminaci případného sbíhání módů ve stejný čas, který by vedl ke spojení signálu a jeho destrukci.

1 Světlo jako vlnění

1.1 Vlastnosti světla

Když James Clerk Maxwell definoval světlo jako vlnění, vytvořil v 19. století milník, který udal směr vývoji teorie světla jako takové. Světlo se šíří ve formě příčného elektromagnetického vlnění. Změna energie elektronů v atomech (z excitovaného stavu do normálního a naopak) zapříčiňuje její vyzařování v podobě elektromagnetického vlnění. Vzhledem k rozměrům atomů nemůže být vlnová délka takovýchto vlnění nikterak velká. A proto se vlnové délky světla vyjadřují nejčastěji v nanometrech. Konkrétněji je světlo definováno jako vlnění o frekvenci od $3,8 \cdot 10^{14}$ Hz do $7,7 \cdot 10^{14}$ Hz, neboli o vlnové délce od 390 nm do 750 nm. [1]

Toto spektrum lze dále rozdělit na 3 části (vzestupně podle frekvencí). Infračervené (do $3,9 \cdot 10^{14}$ Hz), Viditelné ($3,9 \cdot 10^{14}$ Hz až $7,9 \cdot 10^{14}$ Hz [390nm -760nm]) a Ultrafialové (od $7,9 \cdot 10^{14}$ Hz), jak jej lze vidět na obrázku 1.1. [8]



Obrázek 1.1: Zařazení světla do elektromagnetického spektra

Jelikož světlo nepotřebuje ke svému šíření žádné prostředí, je schopno se šířit i ve vakuu. Rychlost světla c je maximální možná rychlost šíření světla ($c = 299792458 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$). V látkovém prostředí je rychlost vždy menší, protože prostředí klade vlnění odpor a de facto jej zpomaluje. Rychlost šíření světla je v neposlední řadě závislá i na frekvenci světla. Základem vlnové optiky je její vlnová rovnice. Rychlost c_0 je v této rovnici reprezentována jako rychlost světelné vlny

ve vakuu. V reálném životě se však světlo šíří často jinými prostředními s jiným indexem lomu $n \geq 1$. [2]

Rychlost světla v konkrétním prostředí c : $c = \frac{c_0}{n}$

V matematice se pro reálnou funkci polohy optické vlny používá zpis $r = (x, y, z)$ a čas t . Z ní se pak dá vytvořit takzvaná vlnová funkce $u(r, t)$, která vyhovuje následující vlnové rovnici. Kde ∇^2 je Laplaceův operátor, jenž se rovná $\nabla^2 = \partial^2 / \partial x^2 + \partial^2 / \partial y^2 + \partial^2 / \partial z^2$ a každá vyhovující funkce vlnové rovnici popisuje možnou optickou vlnu.

$$\nabla^2 u - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = 0$$

Platí zde princip superpozice. $u(r, t) = u_1(r, t) + u_2(r, t)$. [1]

1.2 Vlnová optika

V úvodu byla nastolena premisa, že se světlo šíří ve formě vln. Rychlost c_0 je v této rovnici reprezentována jako rychlost světelné vlny ve vakuu. V reálném životě se však světlo šíří často jinými prostředními s jiným indexem lomu $n (\geq 1)$. [2]

Index lomu látky je vztažený poměr, který definuje, kolikrát je rychlost světla v látce menší než ve vakuu. Proto je index lomu v látkách větší než jedna a zároveň index lomu vakua je roven jedné. Tento index však není konstantní, jelikož je závislý na vlnové délce světla. Lze jej ověřit například na disperzi polychromatického (bílého) světla při průchodu optickým hranolem, kdy se světlo rozloží na jednotlivé složky spektra. [1]

Jedním z nejzásadnějších parametrů šíření světla je vlnová délka λ . Ta označuje délku jedné periody šířící se vlny. Světlo je buď monochromatické, které se skládá pouze z jedné konkrétní vlnové délky, nebo takzvané bílé světlo. Což je světlo, složené z nekonečně mnoho vlnových délek. [2]

Světlo se šíří jako vlnění. A to, v jakém směru osciluje, určuje polarizace. Tu lze určit v rovině kolmé ke směru šíření světla. Polarizace je v této rovině lineární (vlnění kmitá na normále ke směru šíření). [1,2]

1.2.1 Intenzita, výkon a energie

Výkon je ve fyzice označován jako práce nebo energie, vykonaná za určitý čas. V optice jsou tyto veličiny obohaceny ještě o intenzitu. Ta je definovaná jako optický výkon, který dopadá

na jednotku plochy $[\text{W}/\text{cm}^2]$. Intenzita je úměrná střední hodnotě druhé mocniny vlnové funkce. [1]

$$\text{Optická intenzita } P(t) = \int_A I(r, t) dA$$

Tento výpočet lze popsat jako obsah pod křivkou na časové základně konkrétní vlnové délky. Rozhodující je též amplituda, od které se výkon odvozuje. [1]

1.2.2 Druhy vln

Pro charakterizaci vlny používáme základní rozdělení na vlny rovinné a sférické. Rovinná vlna se ve svém směru šíření šíří ve formě vlnoploch, což jsou de facto normály k ose šíření.

Sférická, někdy též nazývaná kulová vlna, má koncentrické vlnoplochy (mezikruží). Je-li zapotřebí řešit sférickou vlnu skalárně, bude to přesným řešením vlnové rovnice. U vektorového řešení lze využít Huygensova principu v případě, že je použit například bodový zdroj vlnění. [2,3]

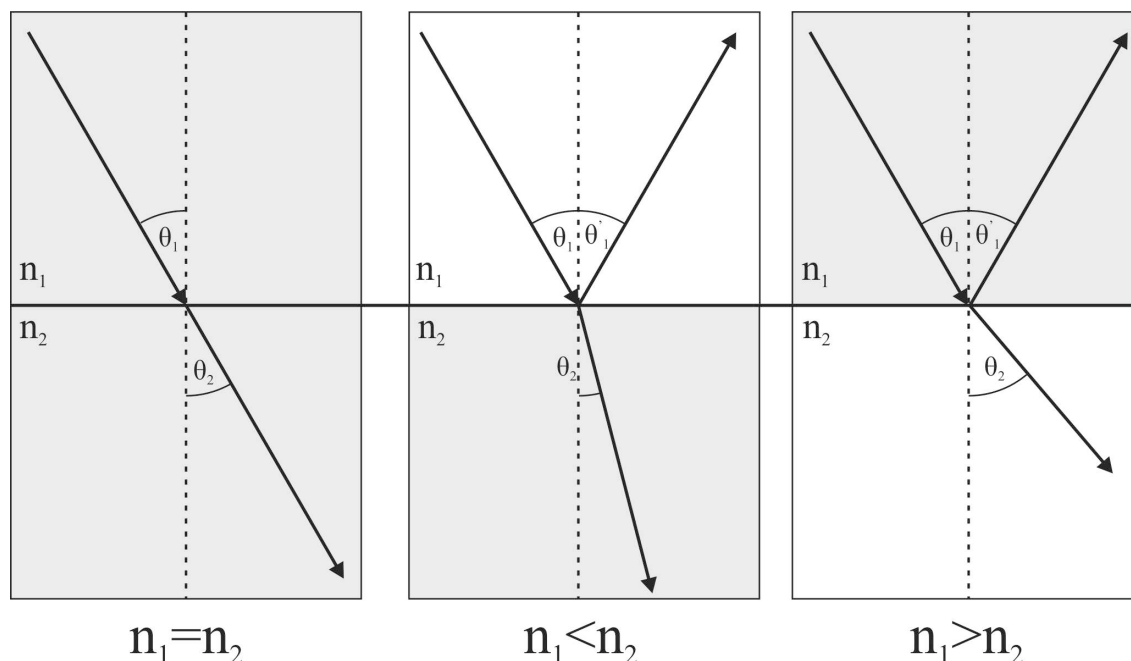
Sférická vlna může vzniknout například průchodem rovinné vlny velmi malou bodovou štěrbinou (o velikosti srovnatelné s vlnovou délkou), kdy štěrbina může být považována jako bodový zdroj vlnění. Tím pádem se podle Huygensova bude vlnění z tohoto bodu vycházející, šířit všemi směry stejně. Tedy v kruhových (sférických) vlnách. [3]

1.2.3 Jevy na rozhraní dvou objektů

1.2.3.1 Odraz a lom

Tyto dva jevy se navzájem doplňují. Na rozhraní dvou optických prostředí s různým indexem lomu pod úhlem ϕ_1 (od kolmice rozhraní). Zde nastávají odraz a lom světla. Zatímco lom je popsán přímou úměrou, tedy úhel dopadajícího paprsku ϕ_1 je roven odraženému paprsku ϕ_2 , zákon lomu je závislý na optické hustotě obou prostředí. Kde n_1 , n_2 jsou indexy lomu obou prostředí a ϕ_1 , ϕ_2 jsou příslušné uhly světla od kolmice v daném prostředí. [8]

$$n_1 * \sin \phi_1 = n_2 * \sin \phi_2$$



Obrázek 1.2.3.1: Odraz a lom světla

Jsou-li obě optická prostředí stejná, směr chodu paprsku zůstane nezměněn. Přechází-li paprsek z opticky řidšího do hustšího prostředí ($n_1 < n_2$), dochází k lomu ke kolmici. V opačném případě ($n_1 > n_2$) dochází k lomu od kolmice. Pro názornost je možno tyto jevy pozorovat na Obrázku 1.2.3.1.[1]

Zvláštní případy, které jsou charakteristické a žádoucí pro vedení módů ve vláknech, jsou mezní úhel a totální odraz. Totální odraz nastává, dopadá-li vlněná pod úhlem menším, než je úhel mezní. Do druhého prostředí se tedy vlnění vůbec nedostane a odrazí se zpět do prostředí. Mezní úhel θ_m je úhel, při kterém se světlo na rozhraní láme a dále se jím šíří. [1]

$$\theta_m = \arcsin \frac{n_2}{n_1}$$

Při překročení tohoto úhlu dojde k prostoupení světla skrze rozhraní. [2,8]

1.2.3.2 Disperze světla

Jelikož se každá vlnová délka světla láme pod jiným úhlem, a v polychromatickém světlu je zastoupenou nekonečně mnoho vlnových délek, dochází při průchodu rozhraním dvou opticky

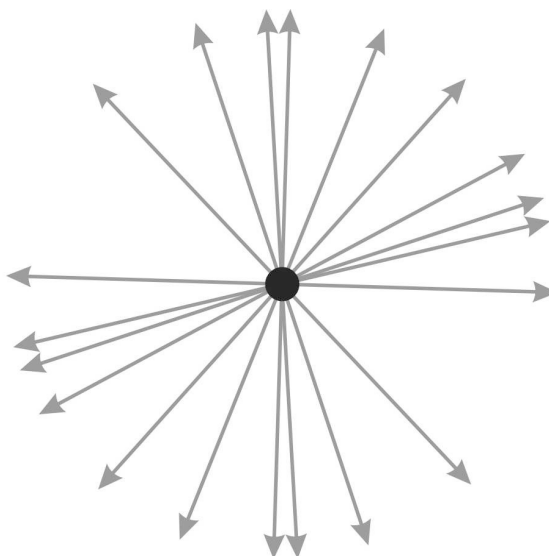
různých prostředí k rozdělení svazku na jednotlivé vlnové délky. Protože je index lomu prostředí n roven podílu rychlosti světla c a rychlosti šíření světla v prostředí v ,

$$n = \frac{c}{v} = \frac{\lambda_0}{\lambda}$$

získá se tak funkční závislost jednotlivých vlnových délek, jenž jsou nepřímo úměrné úhlu lomu. Jinými slovy se zvyšující se vlnovou délkou se snižuje úhel ohybu jednotlivé vlnové délky. Přírodním úkazem je například duha. [4]

1.2.3.3 Polarizace

Jelikož každé elektromagnetické vlnění se ve směru šíření určitým způsobem vlní, činí tak v jedné přímce. Tato vlastnost se nazývá polarizace. Světlo, šířící se běžně kolem nás (například sluneční záření), je nepolarizované. Protože jednotlivé složky světelného spektra mají každá rozdílné „příčné natočení“ šířící se vlny. Aby se dalo jakýmsi způsobem zuniformovat světlo pouze v jednu polarizovanou složku, používají se k tomu polarizační filtry, které vlnění propustí pouze v jednom směru. Polarizační filtr má využití v LCD a také při fotografování k odstranění odlesků či oslnění od okolních zdrojů odraženého světla okolo foceného objektu. [1,2]



Obrázek 1.2.3.3: Nepolarizované světlo

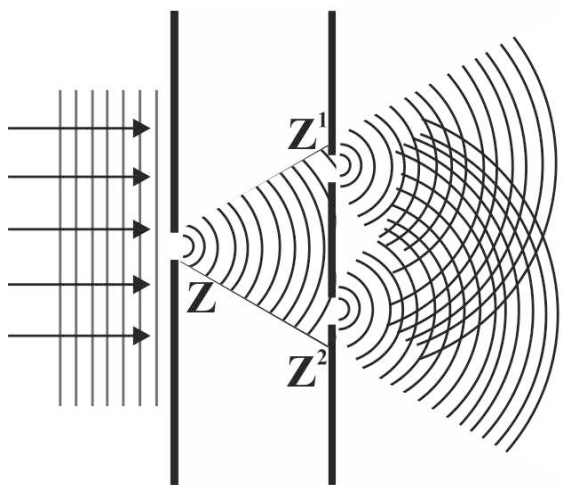
Světlo se, co se týče polarizací, dělí na polarizované a nepolarizované. Zatímco všechny normály polarizovaného světla kmitají ve stejném směru (použití v telekomunikacích buď horizontálně nebo vertikálně), u nepolarizovaného světla kmitají jednotlivé normály, každá pod jiným úhlem (viz. Obrázek 1.2.3.3). [1,2]

1.2.3.4 Interference

Jsou-li 2 nebo více zdrojů šíření světla, šíří se každé vlnění nezávisle na sobě. Kde však bude docházet k jejich průniku, budou se jednotlivá vlnění sčítat. V jednotlivých průnicích se pak budou tvořit maxima s nejvyšší intenzitou, naopak ve zbylých místech bude intenzita světla minimální (vlnění se od sebe odečtou). Děje-li se tento jev například v rovině stínítka, vzniká interferenční obrazec. [1,4]

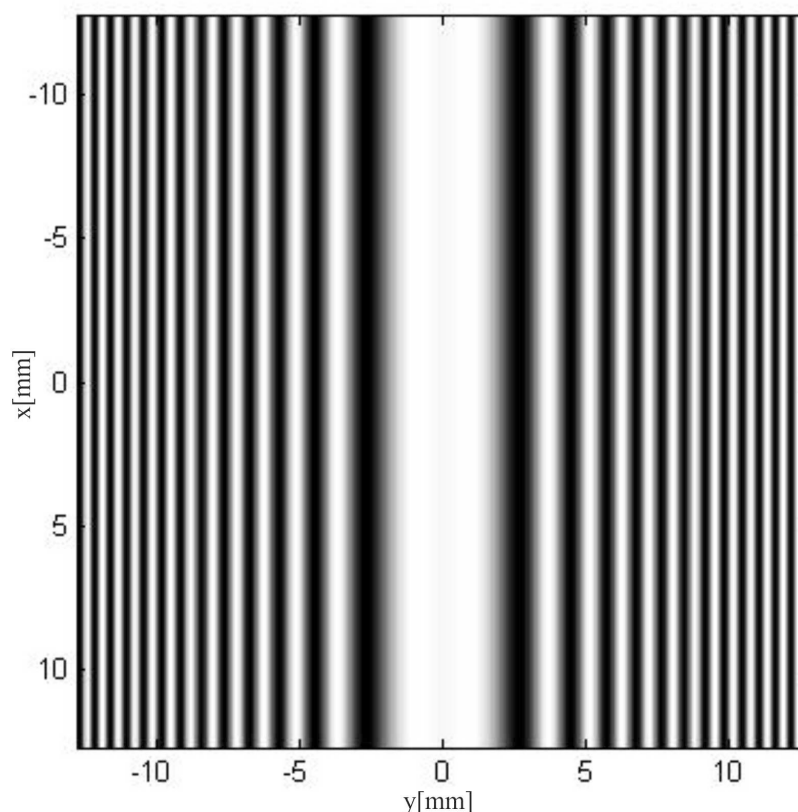
V roce 1801 Thomas Young vytvořil stejnojmenný pokus (viz obrázek 1.2.3.4-1), kterým potvrdil Huygensovu teorii. Huygensův princip spočívá v pojetí šíření rovinné vlny, kdy každý bod vlnoplochy je předpokládán jako elementární zdroj vlnění, z něhož se dále šíří světlo ve formě elementárního vlnění. Pokus spočíval vysláním sférické vlny na dvě štěrby o velmi malých rozměrech (srovnatelných s vlnovou délkou vysílaného světla). U tohoto pokusu dochází na štěrbinách kruhového průřezu k difrakci světla. [1,3,4]

Jelikož jsou rozměry štěrbin srovnatelné s vlnovou délkou vlnění, které na ně dopadá, chovají se tyto štěrby jako bodový zdroj vlnění vysílající sférické vlnoplochy.



Obrázek 1.2.3.4-1: Youngův pokus

Tento pokus byl experimentálně ověřen v laboratoři (VIZ. kapitola 4.1.2.2 a 4.1.2.3). V prostředí Matlab byl nasimulován podobný pokus. Interference sférické a rovinné vlny lze spatřit na Obrázku 1.2.3.4-2. [1,4]

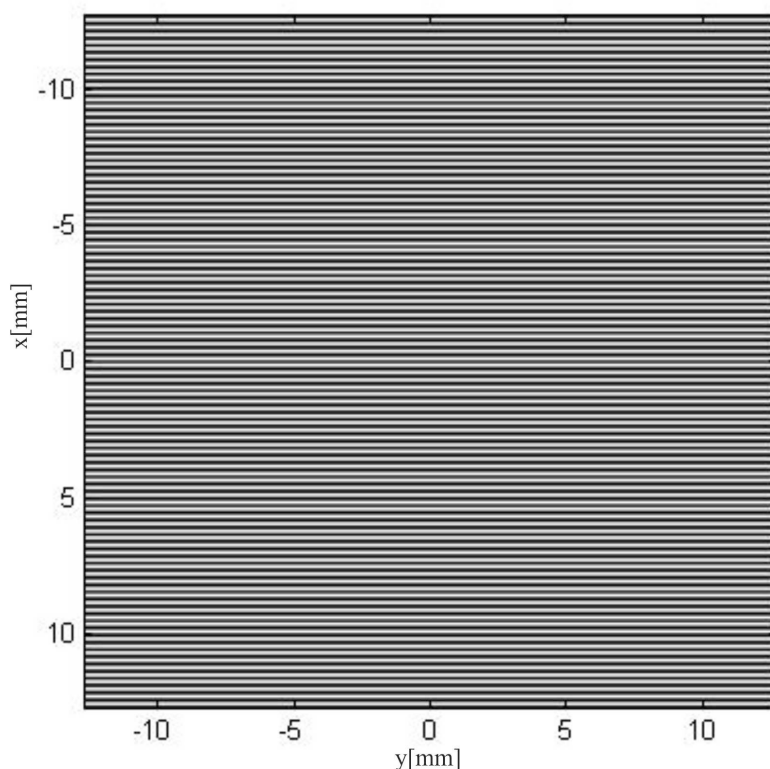


Obrázek 1.2.3.4-2: Interferenční obrazec sférické a rovinné vlny

Interferenci lze využít například v interferometrech, což jsou přístroje pro velmi přesná měření. Interferometry využívají dělič svazku světla, přicházejícího ze zdroje, a každý svazek pak urazí různou dráhu. Následně se buď dalším, nebo stejným děličem svazku spojí, detekuje změnu a porovnává rozdíly intenzit. [5]

Zároveň byl v prostředí Matlab také nasimulován interferenční obrazec dvou rovinných vln. Byl proveden přepočet do polárních souřadnic (směr šíření vlnoploch ve směru osy z). Grafický výstup této simulace je možno vidět na Obrázku 1.2.3.4-3. Bílé pruhy reprezentují maximální intenzitu výsledného vlnění, tedy došlo ke konstrukční interferenci. Tmavé a černé odstíny pak

v závislosti na sytosti vyjadřují místa s nejnižším součtem obou intenzit, jenž se nazývají interferenční minima.



Obrázek 1.2.3.4-3: Interferenční obrazec 2 rovinných vln

1.2.3.5 Difrakce

Difrakce, neboli ohyb vlnění, je jev vznikající průchodem vlnění buď kolem nebo skrze překážku, která vlnění jistým způsobem naruší. Bývá též často vysvětlován pomocí Huygensova principu. [25]

Šířením rovinné vlny a jejím následným kolmým dopadem na štěrbinu s rozměry mnohem většími, než li je vlnová délka dopadajícího záření, je vlnění na obvodu štěrbinu narušeno jen velmi málo. Difrakce se v tomto případě uplatňuje jen velmi málo a vlnění se za tímto místem šíří přímočaře. [1,25]

Bude-li dopadat rovinná vlna na štěrbinu s rozměry, které jsou srovnatelné s vlnovou délkou vlnění, dojde k ohybu vlnění a proniknutí až do takzvaného geometrického stínu (v pravoúhlém

zobrazení je stín za překážkou). Vlnění již neprochází přímočaře, ale je aproximováno do tvaru kužele. Jeho výstupní úhly jsou závislé na úhlu dopadu rovinné vlny na štěrbinu. Je-li ještě navíc štěrbina striktně kruhového charakteru, chová se štěrbina jako bodový zdroj elementárního vlnění a po průchodu štěrbinou dojde k vytvoření sférické vlny. V této práci byla difrakce experimentálně ověřena Youngovým pokusem. [1,25]

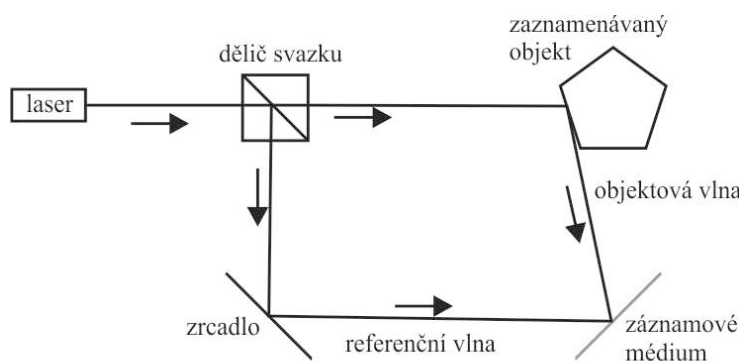
1.3 Holografie

Již v dávných dobách 15. století se Leonardo da Vinci pokoušel zachytit na ploše svých skic a obrazů hloubku (tedy třetí rozměr). Ve svých dílech začal používat perspektivu a značnou oblibou se staly též jeho stereogramy. Stereogram je optická iluze prostorového vidění dvourozměrného obrazu. Jeho realizace spočívá v zachycení objektu skrze dvou obrazů, přičemž každý je zachycen z jiných úhlů. Dva obrazy jsou vyobrazeny buď vedle sebe nebo „na sobě“ (jejich průnik, vytvářející anaglyf). Aby bylo možné vytvořit trojrozměrný obraz, využívá se vlastností nedokonalosti oka. Jako jsou například „šilhavost“, kdy se při pozorování dvou obrazů vedle sebe používá pro levý obraz pravé oko a pro pravý obraz oko levé. Dále lze tyto stereogramy prohlížet stereoskopem bez jakýchkoli nepříjemnějších akomodací a zaostření oka. Žádná z těchto metod ale nevytváří skutečné prostorové pole. Jedná se vždy o virtuální obrazy v lidské mysli.[6,9,10]

Holografie je část Fourierovské optiky a zahrnuje záznam a rekonstrukci optických vln. Při jejich záznamu a zpětné rekonstrukci se využívá zejména interference vln silně koherentního záření (minimální spektrální rozptyl zdroje, minimální fázový rozdíl jednotlivých složek a podobně). V podstatě, jak již z řečtiny plyne přímý překlad „úplný záznam“, se jedná o dvourozměrný záznam třírozměrného objektu. Záznamovým prvkem v holografii je hologram. Na rozdíl od fotografie, která nese pouze informaci o intenzitě světla, hologram nese ještě zároveň fázi zaznamenávaného objektu. Na základě těchto zachycených informací lze rekonstruovat pomocí koherentního záření třírozměrný obraz objektu. Jejímu praktickému využití se dostalo až v šedesátých letech, kdy byl vynalezen laser, jakožto zdroj koherentního záření. [6,7,9,10]

1.3.1 Záznam hologramu

Klasická holografie využívá pro samotné zaznamenávání na záznamové médium interferenci objektové a referenční vlny. Obě vlny jsou koherentní, aby nedocházelo k náhodným interferencím a celkové deformaci obrazu. Jak je na Obrázku 1.3.1 znázorněno,

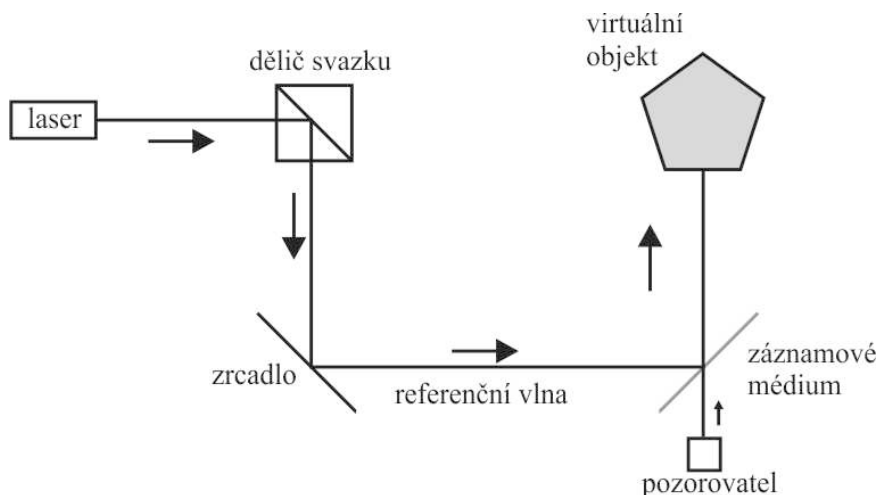


Obrázek 1.3.1: Záznam hologramu

skrze dělič svazku prochází laserový svazek tak, aby jeden svazek dopadal na zaznamenávaný objekt a z něj se pak odrážel na záznamové médium. Tato vlna se nazývá objektová. Protože odražená objektová vlna bude mít již po odražení z objektu na některých místech rozdílnou fázi i amplitudu, je zapotřebí získat referenci (referenční vlnou), aby bylo možné hologram opět zpětně rekonstruovat. V tomto okamžiku je žádoucí, aby tyto dvě vlny dopadaly do stejného místa na záznamové médium, na kterém budou interferovat za vytvořením interferenčního obrazce. [7]

1.3.2 Rekonstrukce hologramu

Na záznamovém médiu je nyní v interferenčním obrazci v každém bodu uložena informace o fázi a amplitudě. Aby ale mohl být správně rekonstruován a zobrazen, potřebuje mít opět k objektu vztah, referenci. Při rekonstrukci již není zapotřebí objektová vlna, jelikož je zaznamenána na médiu. To pak při exponování referenční vlny (viz. Obrázek 1.3.2) vytvoří virtuální obraz přesně na místě zaznamenávaného objektu jako při jeho konstrukci. [10]



Obrázek 1.3.2: Rekonstrukce hologramu

1.4 Fotografie versus hologram

Jak již bylo zmíněno v úvodu, fotografie vzniká záznamem odraženého světla od objektu, procházející skrze objektiv, dopadající na film nebo CCD čip. Každý bod je zachycen jako intenzita vlnění v určité vlnové délce. Získá se tak dvojrozměrný obraz zaznamenávaného objektu. Prostorový dojem si vytváří sám pozorovatel. Fotografii je možno reprodukovat buď exponováním filmu v temné komoře, nebo digitální cestou skrze počítačové formáty obrázků. [11]

Hologram vzniká interferencí objektového a referenčního svazku koherentního laserového záření. Objektový svazek dopadá na záznamové médium (například film) od zaznamenávaného objektu a referenční (vztažný) pak přímo ze zdroje záření na médium. Na rovině média spolu tyto dva svazky interferují a dají tak vzniku interferenčnímu obrazci. Tento výsledek může být správně interpretován až vhodným osvětlením. [11]

1.5 Realizace hologramu

Jelikož je práce s hologramem svázána s vlněním o vlnové délce v řádech stovek nanometrů, je striktně nutné mít k výrobě kopie předlohy velice přesné optické přístroje odolné vůči otřesům a teplotním výkyvům. Typů klasických hologramů je několik. [7]

První z nich, který v této práci bude také prakticky ověřen ve formě PGH, je laserový transmisní hologram. Aby bylo možné správně interpretovat hologram, je nutné při konstrukci a rekonstrukci použít laser se stejnou vlnovou délkou. Na médium, na kterém je zaznamenán interferenční obrazec, dopadá referenční a objektový svazek. Oba ze stejné strany. Po průchodu obou svazků interferenčním obrazcem se vlnění začne rozptylovat, interferovat a na vzdálené stínítko promítne hologram. Tento systém bývá velice často používán při zobrazování různých předmětů či obrazců ve výstavních síních, muzeích a technických institutech, které nemohou být z mnoha aspektů vystavovány. [6]

Druhý, neméně často používaný hologram se nazývá reflexní. Reflexní, neboli také odrazní, se jmenuje podle způsobu jeho rekonstrukce, kdy objektový a referenční svazek dopadají každý z jiné strany média, na kterém je zaznamenán interferenční obrazec. Výhodou oproti transmisnímu hologramu je jeho možnost pozorování v bílém (nekoherentním) světle. Reflexní hologram se sestává z několika vrstev, přičemž svrchní vrstva slouží jako filtr určitého nežádoucího světla a propustí jen to, jenž je vhodné pro pozorování hologramu. Aby bylo možné hologram vytisknout, je zapotřebí vytvořit negativní matici. Ta se skládá z několika na sobě položených identických transmisních hologramů, přičemž každý je vytvořen pomocí koherentních vlnění o různých vlnových délkách. Po osvětlení této matrice bílým světlem je průchodem jednotlivými vrstvami zabezpečena chromatická disperze (rozklad složek barevného spektra, lámající se pod různými úhly). Exponováním této matrice laserem vznikne sekundární reflexní hologram, jenž je pak připraven k ražbě. Tento princip je využit při tvorbě bezpečnostních prvků u bankovek, ochranných štítků a dokonce ve stomatologii jako snímání profilu zubů a klenby. [6,15]

2 Počítačem generované hologramy

2.1 Charakteristika

Počítačem generovaný hologram se od klasického hologramu liší především konstrukcí. Ve své podstatě je oproti klasickému hologramu neoptický, tedy je tvořen pouze jednou vrstvou, která po prosvícení propustí jen určité (chtěné) body. Oproti klasickému hologramu konstrukce PGH má při zaznamenávání a rekonstrukci jakousi nepřímou úměru. Čím přesnější bude záznamová technika schopna vytvořit PGH, tím jednodušší a méně citlivá aparatura bude zapotřebí k její rekonstrukci. [7]

Pro výrobu je zapotřebí mít objekt, jehož matematickým výpočtem na konkrétní rozlišení bude vytvořen hologram a dále pak tiskárnu, která na propustné médium jednotlivé body natiskne. Tyto body (pixely) pak mají schopnost absorbovat světlo na příslušném bodu v závislosti na intenzitě černé barvy vyplněného bodu. [11]

2.2 Využití a aplikace

Počítačem generované hologramy začaly nabývat svého významu teprve po vynálezu laseru, jelikož pro svou rekonstrukci potřebují koherentní záření. Od této doby začaly být PGH používány pro simulaci jak elementárních fyzikálních jevů, jako je například interference dvou vln, pak dále také pro vizualizaci různých konstrukčních komponent ve strojařských oborech a průmyslovém designu a v neposlední řadě také k simulaci namáhání jednotlivých strojařských komponent.[10]

V těchto dnech se většina výrobců snaží specializovat konkrétně na zobrazovací techniku (ať už monitory nebo projekční plátna), která by byla schopna na rovině rekonstruovat PGH za vytvořením prostorového vnímání obrazu. Tato technika je velice náročná na přesnost, aby obraz složený z interferenčních maxim a minim vznikaly právě tam, kde má. Vývoj holografických LCD je již v plném proudu, nicméně na uvedení na trh bude zapotřebí si na ně ještě pár let počkat. [10]

2.3 Nahradí hologram Blu-ray?

Vynález záznamu Compact Disc v roce 1985 dal vzniknout nové éře záznamové digitální techniky. Nejednalo se o běžný, elektromagnetický záznam, nýbrž o záznam optický. Jednotlivé bity se zaznamenávaly pomocí červeného laseru na tenkou aluminiovou vrstvu. CD pak byly vystřídány v devadesátých letech DVD- vylepšenou verzí CD s hustějším záznamem. Pochopitelně s tímto faktorem rostl nárok na přesnost, avšak kapacita z 700MB vzrostla na sedminásobek. Novým přírůstkem je Blu-ray disk, který využívá delší vlnovou délku laseru při zápisu či čtení a lépe se tak láme. Jednovrstvé Blu-ray disky pojmu 25GB, dvouvrstvé pak 50GB. [12,13]

Hudbou budoucnosti pro toto tisíciletí by se mohl stát HVD- Holographic Versatile Disc. Jak již z názvu vyplývá, jedná se o optický záznam digitálních informací, uloženého na disku. Jeho kapacita však vzrostla až na neuvěřitelných 6 000GB. Pro čtení a zápis se používají zelené a červené laserové diody. Zelený laser čte informace, zaznamenané na disku jako proužky z holografické vrstvy blízko horní strany disku. Červený laser zde pak slouží jako referenční vlna ke čtení servoinformace z aluminiové vrstvy, obdobně jako u CD. Servoinformace je de facto aktuální informace o pozici čtecího paprsku (čtecí hlavy). Oba laserové paprsky jsou kolimovány do jednoho svazku, šířící se téměř rovnoběžně skrze interferenční filtr. Tento filtr je umístěn mezi aluminiovou vrstvu a holografickými daty. Má unikátní vlastnosti co se týče propouštění pouze jedné vlnové délky v závislosti na úhlu natočení. Jeho přítomnost je zde nutná pro eliminaci nežádoucího lomu světla a vzniku interference mimo směr čtecího svazku. Bohužel, díky tomuto filtru činí HVD inkompatibilním s CD, DVD a Blu-ray. Kvůli enormním nárokům na výrobu jak disků tak mechanik, je představení HVD naplánováno na rok 2019. [14]

3 Módy ve vlákne

3.1 Úvod do optoelektroniky

Optoelektronika je část elektrotechniky, zabývající se optickými členy, jejich konstrukcí, použitím, vlastnostmi světla a jeho chování v optických vláknech a v neposlední řadě též přenosu dat. U optických vláken se šíří mód jádrem. Mód se od stěn jádra odráží buď přímočaře (a protíná tedy osu jádra), elipticky nebo kruhově (ve šroubovici). Vzhledem k těmto rozdílným typům pohybu se liší dráhy a tím pádem i čas průchodu módu celou trasou optického vlákna. Ideální případ přenosu módů je nulový rozdílný čas za jednotnou uraženou dráhu. Aby se daly módy detekovat, je zapotřebí mít zvolenu časovou délku pulzu takovou, aby jednotlivé pulzy módů byly od sebe vzdáleny s dostatečným odstupem. [19]

Při vyslání dvou módů vláknem, kdy se každý šíří po rozdílně dlouhé dráze, může dojít na výstupu vlákna k detekci pouze jednoho pulzu, který vznikne součtem dvou, jenž se „spojily“ díky malému odstupu pulzů a značným rozdílem drah, do jednoho prodlouženého pulzu. [19]

3.2 Selektivní buzení

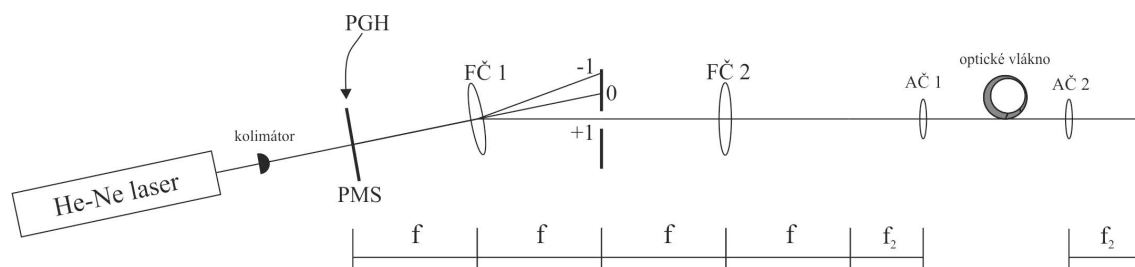
Selektivní buzení je aplikace PGH spolu s prostorovým filtrem. V optoelektronice se využívá zejména k zesílení chtěných a potlačení nežádoucích módů. Díky PMS je možná změna fáze v závislosti na úhlu šíření a následnému vytvoření nelámaného paprsku. [19]

Prostorový modulátor světla (anglicky SLM) „vyselektuje“ z dopadajícího světla pouze žádoucí módy v závislosti na úhlu dopadu a aktuální dislokaci v prostoru. Ostatní potlačí, čímž vznikne -1., 0. a +1. difrakční řád. A právě +1. řád nese v sobě zakódovanou modulaci, čímž je třeba od ostatních dvou oddělit prostorovým filtrem. PGH je vytvořen interferencí svazku s referenční rovinnou vlnou. [19]

3.3 Realizace

Pro uskutečnění je výhodné použít 4-f systém (viz Obrázek 3.3) se zdrojem koherentního záření a použitím kolimátoru. Nejprve je zapotřebí si vytvořit PGH, který určité prostorové frekvence nepropustí a zároveň rozdělí světlo na 3 difrakční řády. Fourierova čočka tyto řády od

sebe oddálí, aby bylo možno na druhé ohniskové vzdálenosti použít prostorový filtr, jenž propustí pouze +1. difrakční řád. [19]



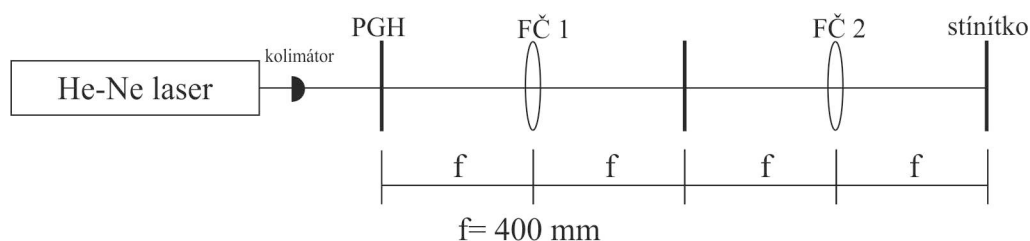
Obrázek 3.3: Selektivní buzení módů za použití PMS

Jelikož došlo ve druhé ohniskové vzdálenosti k fourierově transformaci, je zapotřebí uskutečnit její inverzi, aby se světlo dostalo ze soustavy pod stejnými parametry, jako do ní vstupovalo. Asférické čočky 1 a 2 zajistí přesné navedení veškerého světla do vlákna a z něj. Vzhledem k zakroucení vlákna by na výstupu neměl být ani jeden meridiální mód, tedy mód, který by se šířil přes osu jádra. [19]

4 Realizace PGH

4.1 Návrh

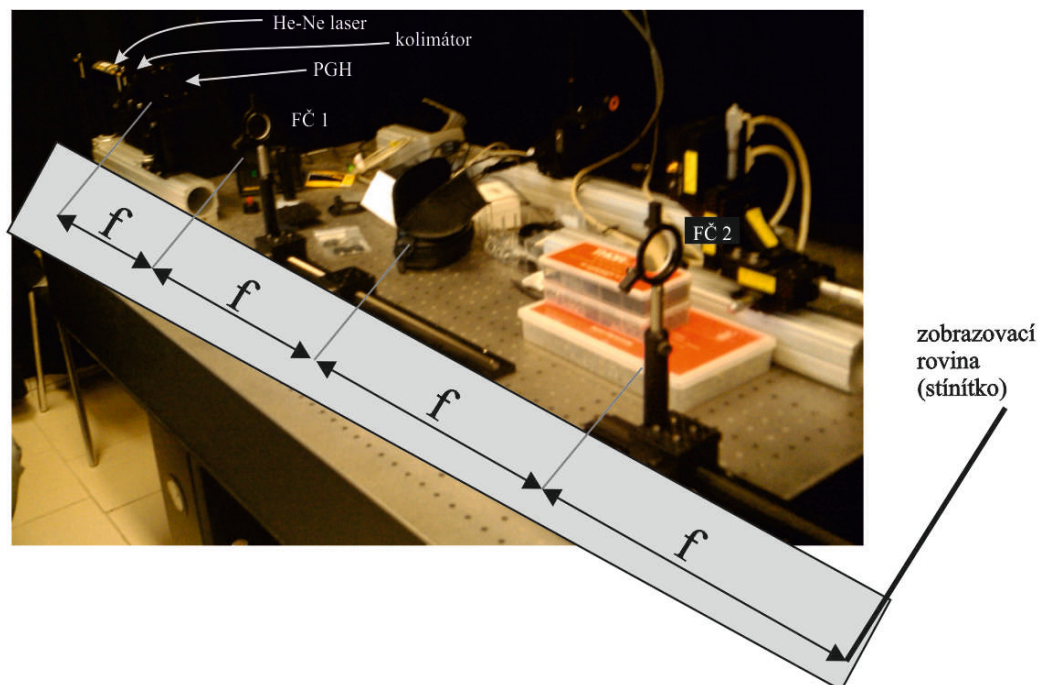
Jelikož se v této práci bude realizovat transmisní počítačem generovaný hologram za laboratorních podmínek, je zapotřebí mít koherentní zdroj vlnění, vytisknutý transmisní PGH a zobrazovací systém. Jako zdroj byl použit helium neonový laser Melles Griot 25-LHP-151-230 třídy 3B (IEC) o vlnové délce 632,8 nm. Maximální výkon laseru je 15 mW. [16]



Obrázek 4.1-1: 4-f zobrazovací systém- schéma

Pro rekonstrukci počítačem generovaného hologramu byl použit 4-f (ohniskový) systém (viz. Obrázek 4.1-1), jehož sestava je složena následovně. Na levé straně je zdroj vlnění (výše zmíněný laser), za ním následuje kolimátor pro vytvoření kolimovaného svazku, jenž je umístěn před nultou ohniskovou vzdáleností. Nultá ohnisková vzdálenost je pro umístění PGH nebo různých apertur. V první ohniskové vzdálenosti, která činí 400 mm, je umístěna bi-konvexní sférická čočka Edmund DCX 40 X 400. Ve druhé ohniskové vzdálenosti se nachází rovina, na které se uskutečňuje fourierova transvornace. Pro rekonstrukci hologramu je možná aplikace různých filtrů například pro zachycení horních prostorových frekvencí (dolní pásmová propust). Aby bylo možné obraz PGH dobře interpretovat, je zapotřebí uskutečnit ještě inverzní fourierovu transformaci, která je realizována druhou bi-konvexní sférickou čočkou (parametry jsou totožné s první čočkou) ve třetí ohniskové vzdálenosti. Čtvrtá ohnisková vzdálenost je pak vhodná pro umístění stínítka k zobrazení hologramu popřípadě pro rovnoměrné rozložení intenzity je vzdálenost možno prodloužit. Pro sestavení celé aparatury byla použit stavebnicový systém Thorlabs pro uchycení komponent. [17,18]

Jak vypadá celá 4-f soustava po sestavení v laboratoři je možno vidět na Obrázku 4.1-2.

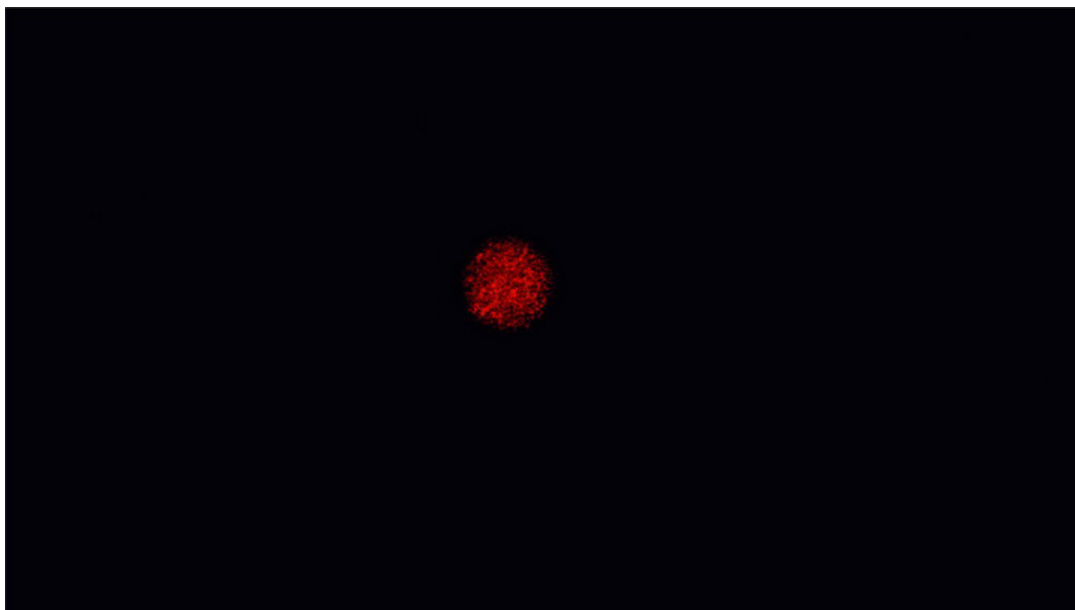


Obrázek 4.1-2: 4-f zobrazovací systém v praxi

4.1.1 Specklový obrazce

Výše popsaná a sestavená 4-f soustava byla použita k pokusu za vytvoření Specklových obrazců. Specklový obrazce jsou útvary vznikající rozdílnými fázemi jednotlivých vlnoploch, dopadající na povrch, na němž se rozptylují. Tyto obrazce se liší v závislosti na drsnosti (zrnatosti) objektu, na který vlnoplochy dopadají, tak jejich četností jenž se náhodně mění. Rozměry obrazců jsou funkčně závislé na vlnové délce šířeného světla, velikosti a rozbíhavosti laserového svazku, vzdáleností zdroje od dopadové roviny a v neposlední řadě na velikosti úhlu dopadu na rovinu. [21]

Tento pokus byl vytvořen za pomoci výše popsané 4-f soustavy bez kolimátoru. Výstup na stínítku je roven Obrázku 4.1.1.



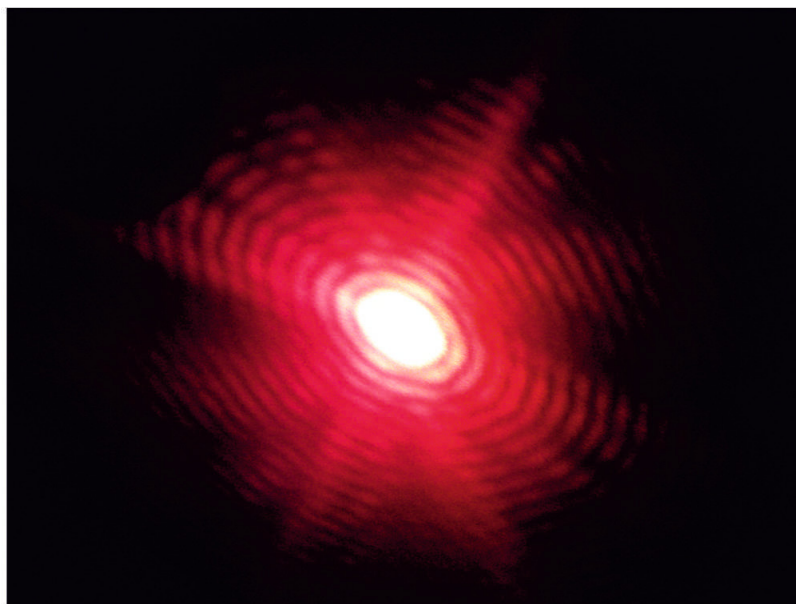
Obrázek 4.1.1: Spekelovy obrazce

4.1.2 Difrakční pokus s kruhovou aperturou

Huygensův princip předpokládá, že v každém okamžiku lze každý bod na čele šířící se vlny chápat jako elementární zdroj vlnění. Pomocí něj se dá vysvětlit difrakce vlnění při průchodu překážkou, nebo v tomto případě kruhovým otvorem o průměru, srovnatelný s vlnovou délkou. Pro tento pokus byl použit 4-f systém ve třech následujících aplikacích. [5]

4.1.2.1 Kruhová apertura

Do nultého ohniska byla umístěna hliníková folie se štěrbinou kruhového profilu. Rozměry kruhové štěrbiny nepřesáhly 0,4 mm. Po uvedení laseru do chodu a vystředění štěrbin se ve 4. ohniskové vzdálenosti zobrazilo mezikruží s velmi vysokou intenzitou světla, které nebylo možno digitálně zachytit z důvodu příliš velké intenzity, soustředěné na velmi malý prostor stínítka. Proto byla promítací vzdálenost za druhou čočkou zvýšena ze 400 mm na 4400 mm. Jak je možno vidět na Obrázku 4.1.2.1, lze pozorovat skutečně výrazná pravidelná mezikruží s dobrým odstupem, a ostrými hranami, jejichž intenzita klesá s rostoucí vzdáleností od středu obrazce.



Obrázek 4.1.2.1: Kruhová apertura vytváří sférickou vlnu

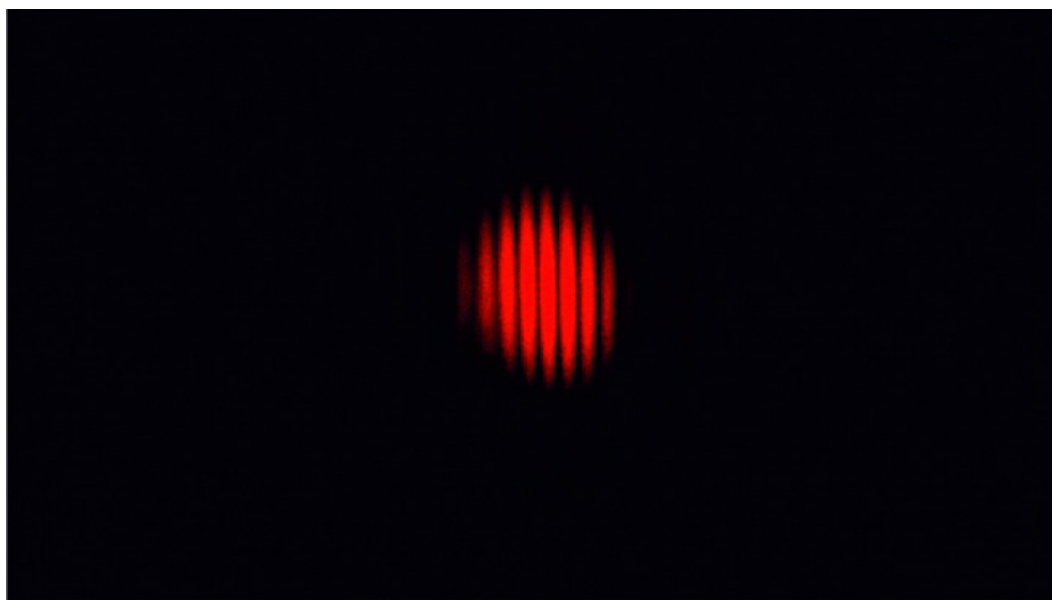
Rozměry (průměr štěrby byl menší než 0,4 mm) kruhové štěrby splnily podmínku být srovnatelně velké jako vlnová délka, čímž se štěrbina začala chovat jako bodový zdroj elementárního vlnění, tedy sférické vlny. Ta pak po kolmém dopadu na stínítko vytvořila okem pozorovatelná mezikruží. Mezikruží jsou lehce deformována úhlem dopadu na stínítko, které zřejmě nebylo naprosto rovné a kolmé ke směru šíření sférické vlny.

4.1.2.2 Youngův pokus- hliníková folie

Sestava a aplikace promítací vzdálenosti je totožná s předchozím pokusem 4.1.2.1 s tím rozdílem, že namísto jedné štěrby umístěné ve středu světelného svazku byly umístěny štěrby dvě. Hliníková folie byla umístěna tak, že střed světelného svazku směřoval přesně mezi obě štěrby, jenž byly vedle sebe v horizontálním směru. [22]

Obrázek 4.1.2.2 názorně potvrzuje úspěšnost realizace Youngova pokusu v laboratoři. Okolo středu svazku lze spatřit nejvyšší intenzitu dvou sférických vlnoploch, jenž každá vzešla z jedné štěrby. Jelikož byl laserový zdroj jen jeden a obě štěrby byly od něj stejně vzdáleny, dopadalo na ně vlnění ve stejné fázi. Čímž bylo zabezpečeno ve výsledné interferenci vzniku skutečných maxim (nejvyšší intenzita světla, jenž lze na Obrázku 4.1.2.2 pozorovat nejsvětleji)

a minim (destruktivní interference, při kterém se intenzita vlnění obou zdrojů/štěrbín vyruší- černé pruhy mezi maximy).

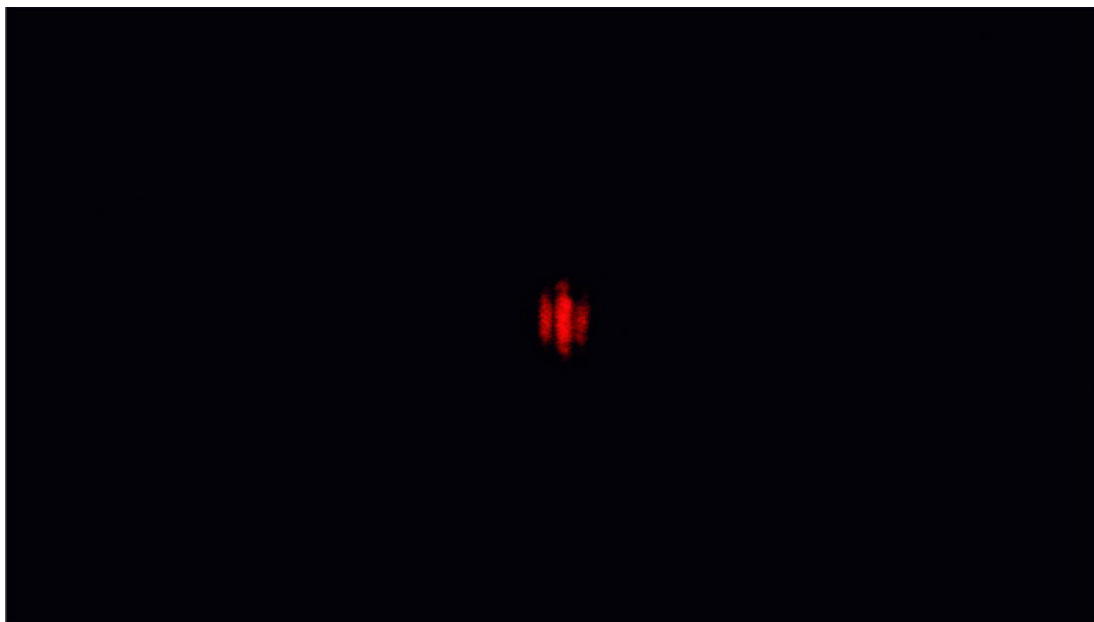


Obrázek 4.1.2.2: Youngův pokus- hliníková folie

Na Obrázku 4.1.2.2 je pozorovatelná naprosto ostrá obálka kruhového tvaru, která byla dána přesným umístěním všech propriet do ohniskových vzdáleností a také díky použití asférických čoček.

4.1.2.3 Youngův pokus jako PGH

Za účelem otestovat schopnost transparentní folie nést počítačem generovaný hologram byl vytvořen Youngův pokus, nasimulovaný v prostředí Matlab a vytisknutý na laserové tiskárně. Celý kód programu je možno shlédnout na CD, soubor „kruh_kruh.m”. Rozměry aktivní plochy folie byly 25,4 mm x 25,4 mm. Průměry kruhových štěrbin byly 62,7 μm , což je zhruba stonásobek vlnové délky laseru, jenž byl použit. Odstup středů obou kruhových štěrbin byl roven dvojnásobku průměru štěrbin. Po vytisknutí apertury na transparentní folii pro laserový tisk byla folie umístěna do nulté ohniskové vzdálenosti. Střed folie PGH byl umístěn do osy celé 4-f soustavy.



Obrázek 4.1.2.3: Youngův pokus- folie

Sestava zůstala nezměněna z pokusu v bodu 4.1.2.2, kromě výměny hliníkové folie s kruhovými štěrbinami za folii transparentní s PGH. Výsledný obrazec je zachycen na Obrázku 4.1.2.3. Jak již je na první pohled zřejmé, četnost výskytu interferenčních maxim již není tak vysoká, jako v předchozím pokusu. Výrazná jsou pouze tři maxima u středu a se vzrůstající vzdáleností ve vodorovném směru vznikl na okrajích šum. Ostatní maxima již není možno rozpoznat. Tento jev by se dal připsat zejména strukturou folie, na jejímž ne zcela rovinném povrchu docházelo k rozptylu a ohybu a také omezující rozlišení tiskárny, jejíž jednotlivé pixely byly velikostně cirká 66-ti násobek vlnové délky laseru.

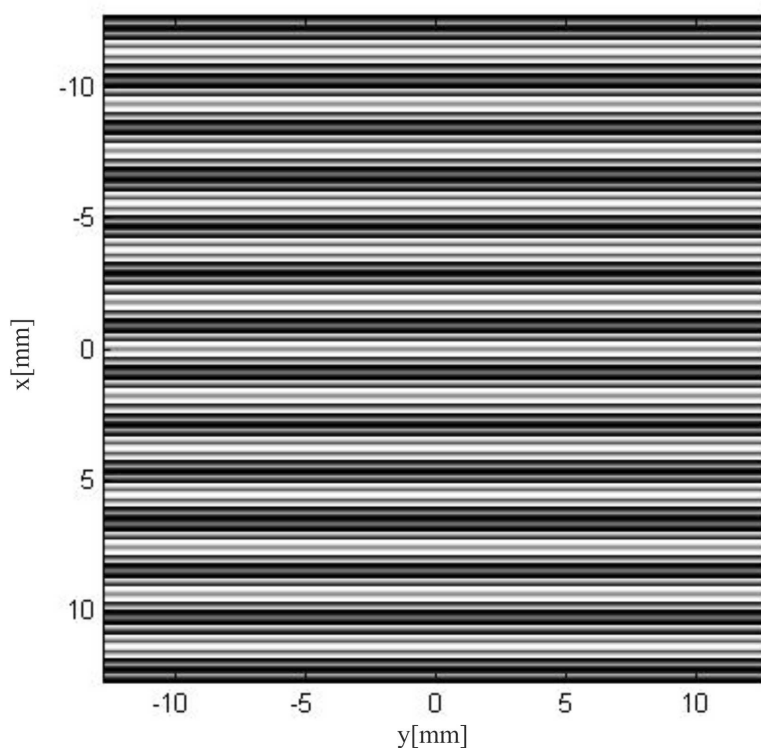
4.2 Vytvoření PGH v prostředí Matlab

Prostředí Matlab slouží k matematickým výpočtům a simulacím. Matlab pracuje s maticemi, jejichž operace jsou v tomto případě řešeny analyticky. Lze v něm nasimulovat i fyzikální jevy jako například interference, čehož bylo využito při tvorbě PGH.

První PGH byla simulace dvou rovinných vln, které dopadají na rovinu stínítka. Na CD, soubor „rov_rov.m“, je ukázka kódu, pomocí kterého byla simulace vytvořena. Nejprve bylo zapotřebí nadefinovat velikost dvourozměrné matice, které byly vzápětí převedeny do polárních souřadnic pro jednodušší práci s vlnami. Následně se musely nadefinovat obě rovinné vlny

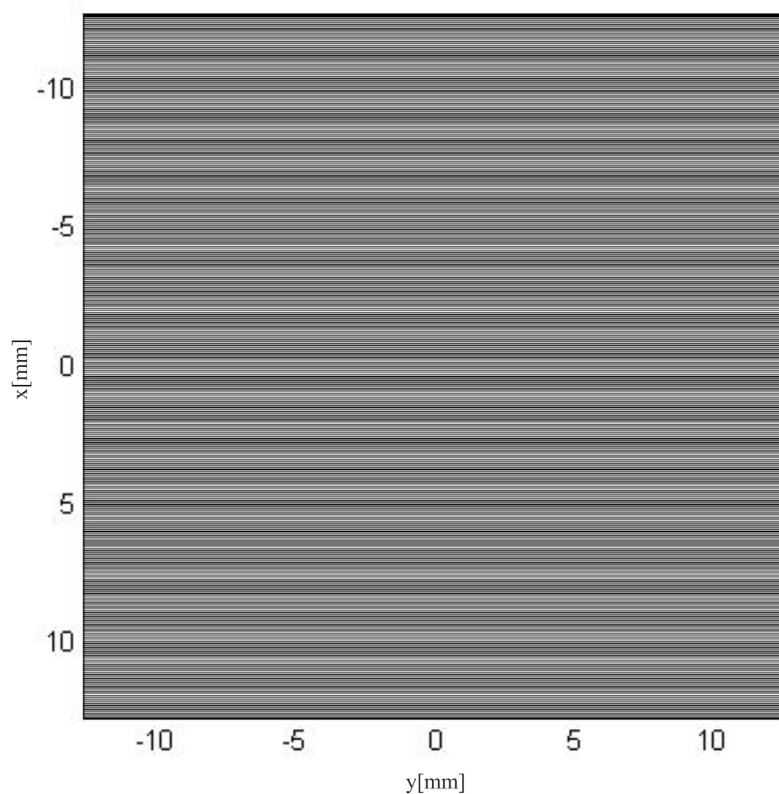
(objektová a referenční), v nichž jsou zakomponovány jejich vlastnosti jako vlnová délka, počáteční fáze a úhel šíření od roviny z. Reálné rozměry PGH byly 25,4 mm x 25,4 mm. PGH byl vyhotoven ve dvou provedeních rozlišení, a to 600 dpi x 600 dpi a dále pak 7 900 dpi x 7 900 dpi. Co se týče výpočetní náročnosti, ta pak rostla se zvyšujícím se rozlišením kvadraticky. Zatímco první PGH s rozlišením 600 dpi trvalo generování cca 2 s, u PGH s rozlišením 7900 dpi trval 6 minut a 16 sekund.

První Obrázek 4.2-1 je v rozlišení 600 dpi.



Obrázek 4.2-1: Interference 2 rovinných vln- 600 dpi

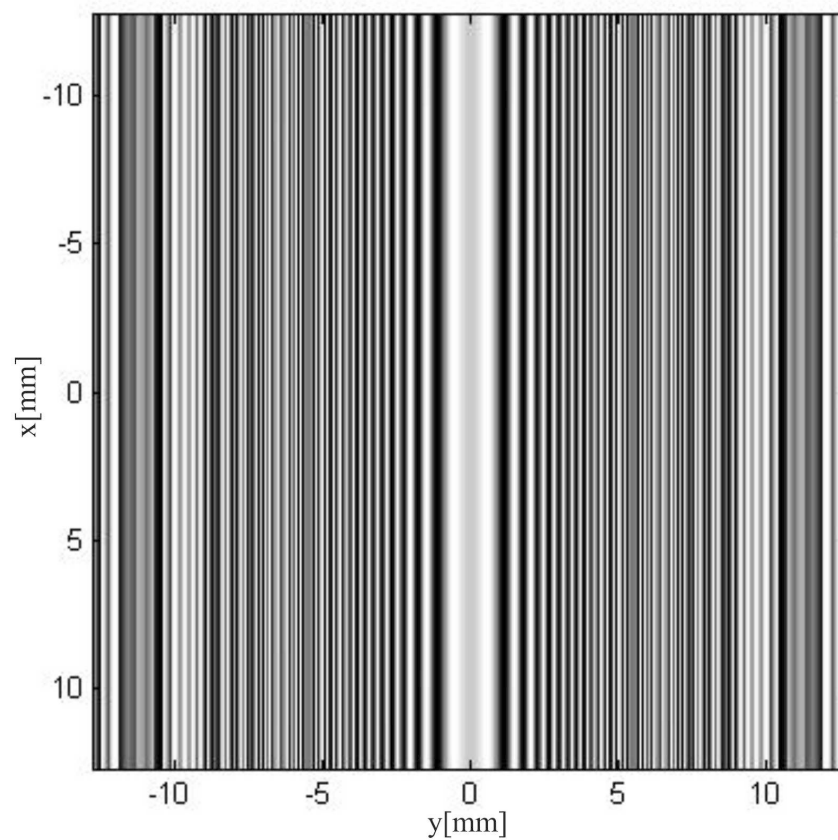
Druhý Obrázek 4.2-2 je v rozlišení 7900 dpi.



Obrázek 4.2-2: Interference 2 rovinných vln- 7 900 dpi

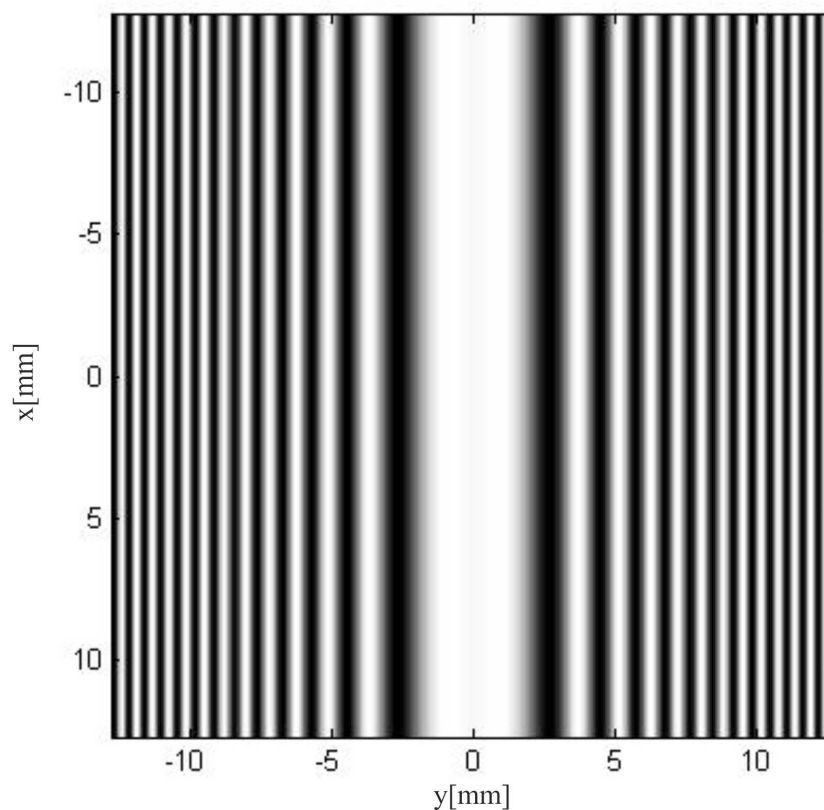
Pouhým okem lze snadno zpozorovat rozdílné odstíny mezi interferenčními maximy a minimy na předchozích vyhotoveních prvního PGH. Z důvodu věrnějšího tisku a zabránění zaokrouhlovacím chybám při výpočtu barev jednotlivých pixelů při tisku byl použit PGH s rozlišením 600 dpi.

Druhý nasimulovaný PGH je interference rovinné a sférické vlny. Syntaxe programu je velice podobná, s tím rozdílem, že sférická vlna se definuje analyticky podobně jako rovnice kruhu. Zde je nutno podotknout, že velice záleží na vzdálenosti zdrojů vlnění od dopadové roviny (stínítka). Totiž s rostoucí vzdáleností se výrazně zvětšuje odstup od maxim a minim. Obrázek 4.2-3 je konstruován pro násobek ohniskové vzdálenosti roven jedné, Obrázek 4.2-4 pak s násobkem 10.



Obrázek 4.2-3: Interference rovinné a sférické vlny

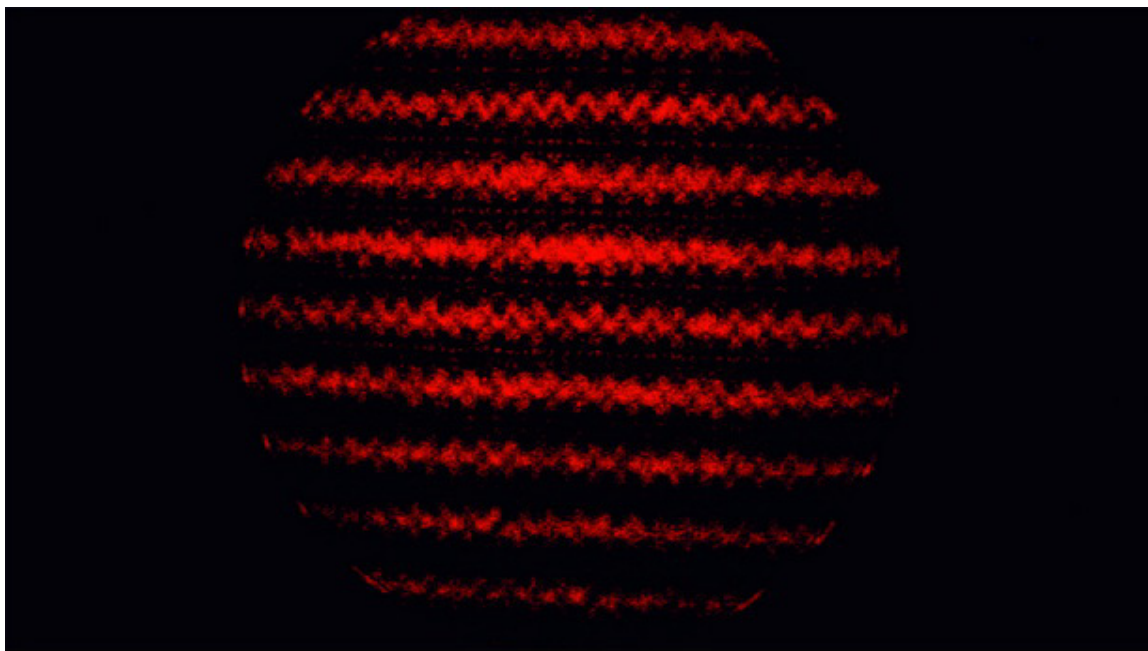
Obrázek 4.2-4 reprezentuje interferenci rovinné a sférické vlny v desetinásobné vzdálenosti ohniskové vzdálenosti zobrazovací čočky, použité v 4-f systému.



Obrázek 4.2-4: Interference rovinné a sférické vlny $Z=10$

4.3 Realizace PGH v laboratoři pomocí 4-f systému

Dle návrhového vzoru v odstavci 4.1 byl sestaven 4-f systém ze stavebnice Thorlabs. Na Obrázku 4.1-2 je možno vidět celou sestavu v praxi. PGH v rozlišení 600 dpi a 7 900 dpi byly PGH vytištěny na transparentní folii. Avšak u PGH s vyšším rozlišením došlo v důsledku nižšího rozlišení laserové tiskárny k deformaci. Jednotlivé body byly mnohem menší než-li jednotlivé pixely tiskárny, jejichž malé rozměry zapříčinily mezery v jednotlivých minimech a maximech. A proto nemohl být tento PGH použit.



Obrázek 4.3-1: Výsledný PGH dvou rovinných vln

Jak lze z Obrázku 4.3-1 vyčíst, jednotlivé maxima nemají tvar jednoduché přímky, nýbrž jsou „pilovitého“ charakteru. Při realizaci PGH byla zmíněna zrnitost folie, která k tomuto jevu přispěla. Z charakteru materiálu folie musí být brán v potaz možný rozměr jednotlivých zrn, které jsou s nejvyšší pravděpodobností rozměrů v řádech jednotek mikrometrů, čímž vznikl v jednotlivých bodech rozptyl a difrakce vlnění. Z tohoto výsledku plyne fakt, že došlo k modulaci zrnitosti periodou jednotlivých bodů, které se na folii nacházely jako pixely PGH.



Obrázek 4.3-2: Výsledný PGH sférické a rovinné vlny

Další nasimulovaný PGH byla interference rovinné a sférické vlny. Na CD je zdrojový kód PGH pod názvem „rov_sfer.m”. Výsledek byl oproti předešlému PGH zcela jasnější, i okolního šumu bylo velice málo. Na Obrázku 4.3-2 lze spatřit jednotlivá maxima a minima dostatečně a zřetelně oddělená od sebe, kdy směrem od středu ke krajům klesá intenzita i velikost maxim a minim.

Závěr

Pro výpočet PGH byl použit stolní PC s procesorem Intel® Core™ i7 CPU 920, logických 8 jader každé o taktovací frekvenci 2,67 GHz, typ paměti RAM DDR3 o celkové kapacitě 6 GB. Dle aktuální nabídky PC sestav jsou tyto výkonové parametry nadstandardní, nicméně při výpočtu PGH s rozlišením 7 900 dpi byl PC maximálně vytížen po dobu 6 min a 16 s. Z čehož plyne obrovská početní náročnost algoritmu, která je pro tvorbu hologramu v dnešních běžných podmínkách zcela nepřekonatelný problém, přestože jsem konstruoval pouze jeden obrázek.

Další problém pro konstrukci a realizaci PGH je volba vhodného média pro tisk. Transparentní folie do laserové tiskárny (použil jsem folie firmy 3M typ PP2500) samotné o sobě rozptylovaly laserový svazek a vnášely do něj šum. Zrnitost těchto folií je příliš hrubá, jak šlo vyčíst v odstavci 4.3, kdy došlo k modulaci zrnitosti jednotlivých pixelů, které se periodicky opakovaly. Následkem čehož došlo k naprosté destrukci obrazu. Vhodným materiálem by mohl být fotografický film.

Aby se samozřejmě dal PGH vytisknout, je zapotřebí mít také tiskárnu s vysokým rozlišením. Rozlišením takovým, aby jeden pixel měl velikost maximálně 5 μm , tedy rozlišením tiskárny ve svislém a vodorovném směru alespoň 6 000 dpi. Provedli jsme pátrání po různých reprografických studiích, kartografiích i konstrukčních kancelářích, ale bohužel neúspěšně. V tomto případě bychom jako jediné možné řešení navrhli vytisknout PGH v několikanásobné zvětšenině a poté přes zvětšovací fotografickou aparaturu přenesl na mikrofilm. Fotografické materiály se v praxi používají pro záznam klasického hologramu a právě tudy by zatím mohla cesta vést.

V článku [23] je zmínka o výzkumu holografických CCD a LCD. Ty by mohly mohl posloužit jako základní kámen pro celou syntetickou holografii, jelikož by se na těchto součástkách dal měnit obraz v reálném čase a díky nim vytvořit například holografické animace nebo v případě CCD zkoumat namáhání konstrukčních komponent ve strojírenství. A v případě HVD by mohlo dojít k nahrazení stávajících DVD či Blu-ray nosičů. Vzhledem k jejich obrovským nárokům na výrobu si však na veškeré holografické zobrazovací nebo zaznamenávací techniky k uvedení na trh budeme muset ještě několik let počkat.

V rámci porovnání počítačem generovaných hologramů jsme dosáhli srovnatelného výsledku s počítačovou simulací zkoumaných jevů.

Literatura

- [1] SALEH, Baaha E.A.; TEICH, Malvin Carl. *Základy fotoniky 1*. Praha : Matfyzpress, 1994. 226 s. ISBN 80-85863-01-4.
- [2] *Světlo jako elektromagnetické vlnění* [online]. Boskovice : [s.n.], 2006 [cit. 2011-04-05]. Dostupné z WWW: <<http://www.soubce.cz/ucitel/vlachova/otazkyFE/22.pdf>>.
- [3] *Sférická vlna*. In Wikipedia : the free encyclopedia [online]. St. Petersburg (Florida) : Wikipedia Foundation, , last modified on 19. 1. 2011 [cit. 2011-04-05]. Dostupné z WWW: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Sf%C3%A9rick%C3%A1_vlna>.
- [4] HALLIDAY, D., RESNICK, R., WALKER, J.: *Fyzika*. 1. vyd. Brno: VUTIUM, 2000
- [5] *Huygensův princip*. In Wikipedia : the free encyclopedia [online]. St. Petersburg (Florida) : Wikipedia Foundation, , last modified on 17.3.2011 [cit. 2011-04-05]. Dostupné z WWW: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Huygens%C5%AFv_princip>.
- [6] *Encyklopedie fyziky* [online]. 2011 [cit. 2011-04-06]. Holografie. Dostupné z WWW: <<http://fyzika.jreichl.com/index.php?sekce=browse&page=457>>.
- [7] TVAROG, Drahoslav. *Počítačem generované hologramy*. Brno, 2010. 54 s. Diplomová práce. Vysoké Učení Technické v Brně.
- [8] Světlo. In Wikipedia : the free encyclopedia [online]. St. Petersburg (Florida) : Wikipedia Foundation, [cit. 2011-04-06]. Dostupné z WWW: <<http://cs.wikipedia.org/wiki/Sv%C4%9Btlo>>.
- [9] Stereogram. In *Wikipedia : the free encyclopedia* [online]. St. Petersburg (Florida) : Wikipedia Foundation, , last modified on 27.3.2011 [cit. 2011-04-12]. Dostupné z WWW: <<http://cs.wikipedia.org/wiki/Stereogram>>.
- [10] ŠIKÝŘ, Michal. *Prostorové zobrazování- technologie* [online]. České Budějovice, 2009. 60 s. Bakalářská práce. Jihočeská Univerzita v Českých Budějovicích. Dostupné z WWW: <http://eamos.pf.jcu.cz/amos/kat_inf/externi/kat_inf_70529/sikyrm00_26/task_2/prostorove_zobrazovani_-_technologie.pdf>.
- [11] ČEZ [online]. [cit. 2011-04-16]. Laser a jeho využití. Dostupné z WWW: <www.cez.cz/edee/content/microsites/laser/k33.htm>.

- [12] *CD-ROM*. In Wikipedia : the free encyclopedia [online]. St. Petersburg (Florida) : Wikipedia Foundation, , last modified on 14.4.2011 [cit. 2011-04-16]. Dostupné z WWW: <<http://en.wikipedia.org/wiki/CD-ROM>>.
- [13] *Blu-ray Disc*. In Wikipedia : the free encyclopedia [online]. St. Petersburg (Florida) : Wikipedia Foundation, , last modified on 14.4.2011 [cit. 2011-04-16]. Dostupné z WWW: <http://en.wikipedia.org/wiki/Blu-ray_Disc>.
- [14] *Holographic Versatile Disc*. In Wikipedia : the free encyclopedia [online]. St. Petersburg (Florida) : Wikipedia Foundation, , last modified on 14.4.2011 [cit. 2011-04-16]. Dostupné z WWW: <http://en.wikipedia.org/wiki/Holographic_Versatile_Disc>.
- [15] *EHow* [online]. 2011 [cit. 2011-04-26]. Hologram types. Dostupné z WWW: <http://www.ehow.com/list_6062700_hologram-types.html>.
- [16] *CVI Melles Griot* [online]. 2010 [cit. 2011-04-27]. LHX1 - Red Cylindrical Helium Neon Laser Systems . Dostupné z WWW: <<http://www.cvimellesgriot.com/products/Red-632.8-nm-Cylindrical-Helium-Neon-Laser-Systems.aspx>>.
- [17] *Thorlabs* [online]. 2010 [cit. 2011-04-27]. LB1391-A - N-BK7 Bi-Convex Lens. Dostupné z WWW: <<http://www.thorlabs.de/thorProduct.cfm?partNumber=LB1391-A>>.
- [18] *Fourier optics#4-f Correlator*. In Wikipedia : the free encyclopedia [online]. St. Petersburg (Florida) : Wikipedia Foundation, , last modified on 2.3.2011 [cit. 2011-03-02]. Dostupné z WWW: <http://en.wikipedia.org/wiki/Fourier_optics#4-f_Correlator>.
- [19] BOUCHAL, Zdeněk; HADERKA, Ondřej; ČELEKOVSKÝ, Radek. Selective excitation of vortex fibre modes using a spatial light modulaor. *New journal of physics*. 19.5.2005, č. 7, s. 125-140. Department of Optics, Palacký University, Av. 17. listopadu 50, 772 07 Olomouc, Czech Republic.
- [20] SYROVÝ, Václav. OD CHLADNIHO K 3D PULSESPI. In Přehled metod zviditelňování kmitů u hudebních nástrojů [online]. Praha : [s.n.], 2006 [cit. 2011-04-27]. Musical Acoustics Research Centre (MARC) Sound Studio of Music Faculty, Academy of Performing Arts in Prague, Malostranské. nám. 13, 11800 Praha 1, Czech Republic. Dostupné z WWW: <<http://zvuk.hamu.cz/vyzkum/dokumenty/Lit136.pdf>>.
- [21] *Speckle pattern*. In Wikipedia : the free encyclopedia [online]. St. Petersburg (Florida) : Wikipedia Foundation, , last modified on 2.3.2011 [cit. 2011-04-27]. Dostupné z WWW: <http://en.wikipedia.org/wiki/Speckle_pattern>.

- [22] *Youngův experiment*. In Wikipedia : the free encyclopedia [online]. St. Petersburg (Florida) : Wikipedia Foundation, , last modified on 2.4.2011 [cit. 2011-04-28]. Dostupné z WWW: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Young%C5%AFv_experiment>.
- [23] Na Yin, Lintao Li, Hongtao Wang, Fei Guo and Wensheng Wang, "Experimental research of CCD/LCD in holography", Proc. SPIE 6832, 68322B (2007); doi:10.1117/12.756893 Dostupné z WWW: <<http://dx.doi.org/10.1117/12.756893>>.
- [24] CCD. In Wikipedia : the free encyclopedia [online]. St. Petersburg (Florida) : Wikipedia Foundation, , last modified on 17.2.2011 [cit. 2011-04-28]. Dostupné z WWW: <<http://cs.wikipedia.org/wiki/CCD>>.
- [25] Difrakce. In Wikipedia : the free encyclopedia [online]. St. Petersburg (Florida) : Wikipedia Foundation, , last modified on 12.4.2011 [cit. 2011-05-02]. Dostupné z WWW: <<http://cs.wikipedia.org/wiki/Difrakce>>.

Přílohy

Příloha 1- jen na CD, soubor „kruh_kruh.m”.

Příloha 2- jen na CD, soubor „rov_rov.m”.

Příloha 3- jen na CD, soubor „rov_sfer.m”.